

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表平11-502620

(43) 公表日 平成11年(1999) 3月2日

(51) Int.Cl.⁸

識別記号

F I

G 0 1 N 23/04

G 0 1 N 23/04

G 2 1 K 1/02

G 2 1 K 1/02

Z

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 28 頁)

(21) 出願番号 特願平8-528711
 (86) (22) 出願日 平成8年(1996) 3月28日
 (85) 翻訳文提出日 平成9年(1997) 9月29日
 (86) 国際出願番号 PCT/AU96/00178
 (87) 国際公開番号 WO96/31098
 (87) 国際公開日 平成8年(1996) 10月3日
 (31) 優先権主張番号 P N 2012
 (32) 優先日 1995年3月28日
 (33) 優先権主張国 オーストラリア (AU)

(71) 出願人 コモンウェルス・サイエンティフィック・
 アンド・インダストリアル・リサーチ・オ
 ーガニゼーション
 オーストラリア2601オーストラリアン・キ
 ャピタル・テリトリ、キャンベル、ライ
 ムストーン・アベニュー
 (72) 発明者 ウィルキンス、スティーブン・ウィリアム
 オーストラリア3130ビクトリア州 ブラッ
 クバーン、ハリー・ストリート9番
 (74) 代理人 弁理士 青山 葆 (外1名)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 硬X線による位相差イメージ法のための簡素化された条件および構成

(57) 【要約】

屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る方法であって、境界に、高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射し、画面上で、境界が対応する強度変化によってイメージ上に表示されるように境界により屈折された放射線の少なくとも一部を受光して、イメージを形成することを含む方法。

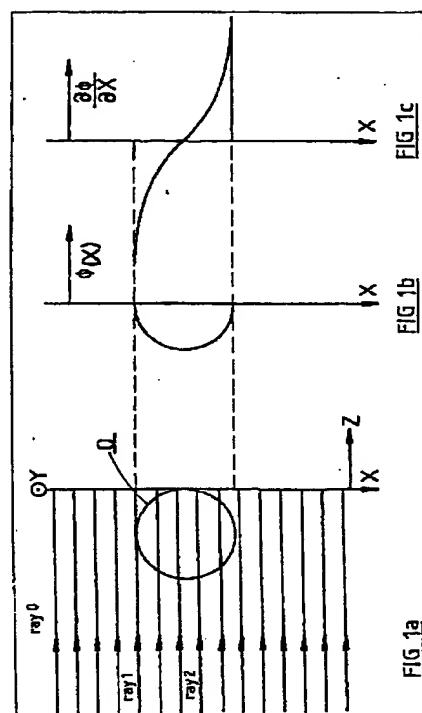


FIGURE 1

(2)

【特許請求の範囲】

1. (補正後) 屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る方法であって

該境界に、高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射し、

該境界がイメージ中の対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように該境界により屈折された該放射線の少なくとも一部を画面上に受光して、該イメージを形成することを含んでなる方法。

2. (補正後) 該強度変化のコントラストを高めるような距離で、境界と画面とを隔てることを含む請求項1に記載の方法。

3. 該距離は、0.3 mに等しいか、それより大きい請求項2に記載の方法。

4. 該距離は、0.7 mに等しいか、それより大きい請求項2に記載の方法。

5. 該放射線の屈折の程度は、長さに依存し、該屈折率変化は、伝搬成分の方向に該境界で維持されている請求項1に記載の方法。

6. 該放射線は、1 keV～1 MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線である請求項1に記載の方法。

7. 該放射線は、多色X線放射線である請求項1に記載の方法。

8. 該放射線を、直径が20 μ mに等しいか、それより小さい放射源により発生させることを含む請求項1に記載の方法。

9. 強度変化は、急峻で局在している請求項1に記載の方法。

10. (補正後) 屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る装置であって、

高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を該境界に照射する放射源、および

該境界がイメージ中の対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように、該境界により屈折された該放射線の少なくとも一部を受光して、該イメージを形成する検出器を有してなる装置。

11. (補正後) 該強度変化のコントラストを高めるような距離で、境界と検

(3)

出器とは隔てられている請求項1に記載の装置。

12. 該距離は、0.3 mに等しいか、それより大きい請求項11に記載の装置。

13. 該距離は、0.7 mに等しいか、それより大きい請求項11に記載の装置。

14. 該放射線の屈折の程度は、長さに依存し、該屈折率変化は、伝搬成分の方向に該境界で維持される請求項10に記載の装置。

15. 該放射源は、1 keV～1 MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線を発生する請求項10に記載の装置。

16. 該放射源は、多色X線放射線を発生する請求項10に記載の装置。

17. 該放射源は、20 μ mに等しいか、それより小さい直径を有する請求項10に記載の装置。

18. 強度変化は、急峻で局在している請求項10に記載の装置。

19. (補正後) 鮮明な屈折率変化を示す内部境界の位相差記録を得る方法であって、

該屈折率変化を横切る方向に伝搬ベクトルの顕著な成分が存在するように伝搬方向を有し、更に、境界における放射線波面の伝搬の局所方向で検知できる変化を生じさせるように屈折率の変化に対して充分高い横方向空間干渉性を有する透過性放射線を境界に照射し、

伝搬の局所方向の該変化の効果を観察でき、放射線の局所減衰または急速な強度変化として記録し、それにより実質的に境界をイメージまたは検出できるような方法で、放射線が境界を横切った後に、該放射線の少なくとも一部分を検出し、記録する方法。

20. 該放射線は、多色X線放射線である請求項19に記載の方法。

21. 該放射線は、1 keV～1 MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線である請求項19に記載の方法。

22. 該放射線を、直径が20 μ mに等しいかそれより小さいX線の放射源により境界に照射することを含む請求項19に記載の方法。

(4)

23. (補正後) 該局所減衰または急速な強度変化の記録を含むイメージの部分のコントラストおよび/または解像度を高めるような距離で、境界と、該放射線の該部分を検出する位置とを隔てることを含む請求項19に記載の方法。

24. 該距離は、0.3 mに等しいか、それより大きい請求項23に記載の方法。

25. 該距離は、0.7 mに等しいか、それより大きい請求項23に記載の方法。

26. (補正後) 鮮明な屈折率変化を示す内部境界の位相差記録を得る装置であって、

該屈折率変化を横切る方向に伝搬ベクトルの顕著な成分が存在するように伝搬方向を有し、更に、境界における放射線波面の伝搬の局所方向で検知できる変化を生じさせるように屈折率の変化に対して充分高い横方向空間干渉性を有する透過性放射線を境界に照射する手段、および

伝搬の局所方向の該変化の効果を観察でき、放射線の局所減衰または急速な強度変化として記録し、それにより実質的に境界をイメージまたは検出できるような方法で、放射線が境界を横切った後に、該放射線の少なくとも一部分を検出し、記録する手段

を有してなる装置。

27. 該放射線は、多色X線放射線である請求項26に記載の装置。

28. 該放射線は、1 keV～1 MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線である請求項26に記載の装置。

29. 該照射手段は、20 μ mに等しいか、それより小さい直径を有するX線の放射源である請求項26に記載の装置。

30. (補正後) 境界と、該放射線の該部分を検出する位置とは、該局所減衰または急速な強度変化の記録を含むイメージの部分のコントラストおよび/または解像度を高めるような距離で隔てられる請求項26に記載の装置。

31. 該距離は、0.3 mに等しいか、それより大きい請求項30に記載の装置。

(5)

32. 該距離は、0.7 mに等しいか、それより大きい請求項30に記載の装置。

33. (補正後) 屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る方法であつて、

該境界に、高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射し、

該境界がイメージ中の対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように該境界によりフレネル回折された該放射線の少なくとも一部を画面上に受光して、該イメージを形成することを含んでなる方法。

34. (補正後) 屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る装置であつて、

高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射する放射源、および

該境界がイメージ中の対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように、該境界によりフレネル回折された該放射線の少なくとも一部を受光して、該イメージを形成する検出器を有してなる装置。

35. (削除)

36. (削除)

37. (削除)

38. 請求項1～9または19～23のいずれかに記載の方法を用いて得たイメージを処理することを含むイメージの位相を決定する方法。

39. 該処理は、電磁放射についてのマックスウエル方程式に基づく請求項38に記載の方法。

40. 該方程式は、強度方程式のトランスポートである請求項39に記載の方法。

41. (追加) 該放射線は、放射源により発生され、ブラッグ回折なしに放射源から該境界へ供給される請求項1に記載の方法。

42. (追加) 該放射線は、放射源により発生され、ブラッグ回折なしに放射

(6)

源から該境界へ供給される請求項10に記載の装置。

(7)

【発明の詳細な説明】

硬X線による位相差イメージ法のための簡素化された条件および構成

本発明は、一般に、X線のような透過性放射線を用いて対象物の構造特性を観察することに関する。より詳しくは、本発明は、限定されるものではないが、内部境界特性のX線位相差記録、例えばイメージング（作像）に関する。

本出願人の国際出願公開WO 95/05725 (PCT/AU 94/00480) および仮特許出願PN 5811/95には、硬X線を用いた差動位相差 (differential phase-contrast) イメージングに適した種々の構成および条件が開示されている。他の開示が、ソビエト特許第1402871号および米国特許第5319694号に見られる。少なくとも数種の形態では、吸収差放射線写真法の従来の方法により密接に関連した比較的簡易な条件および構成を、硬X線による差動位相差イメージングに用いることが望ましい。

本発明によれば、屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る方法であって、

該境界に、高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射し、

画面上で、該境界が対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように該境界により屈折された該放射線の少なくとも一部を受光して、該イメージを形成することを含んでなる方法が提供される。

また、本発明によれば、屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る装置であって、

高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を該境界に照射する放射源、および

該境界が対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように、該境界により屈折された該放射線の少なくとも一部を受光して、該イメージを形成する検出器を有してなる装置が提供される。

更に、本発明によれば、鮮明な屈折率変化を有する又は厚さ変化により規定される内部境界の位相差記録を得る方法であって、

(8)

該屈折率変化を横切る方向または該厚さ変化の方向に伝搬ベクトルの顕著な成分 (significant component) が存在するように伝搬方向を有し、更に、境界における放射線波面の伝搬の局所方向で検知できる変化を生じさせるように屈折率または厚さの変化に対して充分高い横方向空間干渉性を有する透過性放射線を境界に照射し、

伝搬の局所方向の該変化の効果を観察でき、放射線の局所減衰または急速な強度変化として記録し、それにより実質的に境界をイメージできるような方法で、放射線が境界を横切った後に、該放射線の少なくとも一部分を検出し、記録する方法が提供される。

本発明によれば、鮮明な屈折率変化を有する又は厚さ変化により規定される内部境界の位相差記録を得る装置であって、

該屈折率変化を横切る方向または該厚さ変化の方向に伝搬ベクトルの顕著な成分が存在するように伝搬方向を有し、更に、境界における放射線波面の伝搬の局所方向で検知できる変化を生じさせるように屈折率または厚さの変化に対して充分高い横方向空間干渉性を有する透過性放射線を境界に照射する手段、および伝搬の局所方向の該変化の効果を観察でき、放射線の局所減衰または急速な強度変化として記録し、それにより実質的に境界をイメージできるような方法で、放射線が境界を横切った後に、該放射線の少なくとも一部分を検出し、記録する手段

を有してなる装置が提供される。

加えて、本発明によれば、屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る方法であって、

該境界に、高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射し、

画面上で、該境界が対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように該境界によりフレネル回折された該放射線の少なくとも一部を受光して、該イメージを形成することを含んでなる方法が提供される。

また、本発明によれば、屈折率変化を示す対象物の境界のイメージを得る装置

(9)

であって、

高い横方向空間干渉性および該屈折率変化を横切る伝搬成分を有する透過性放射線を照射する放射源、および

該境界が対応する強度変化によって該イメージ上に表示されるように、該境界によりフレネル回折された該放射線の少なくとも一部を受光して、該イメージを形成する検出器を有してなる装置が提供される。

本発明によれば、イメージの位相差イメージデータを処理することを含む、イメージの相を決定する方法も提供される。

伝搬の局所方向での変化の強度効果は、好ましくは、記録を形成するイメージ中で観察される。記録、従ってイメージは、写真または電子的な記録またはイメージであってよい。従って、「イメージ」という用語は、強度データの組、例えば強度値のテーブルまたは他の貯蔵された記録中の観察できる効果を意味し、視覚的なものに限定されない。記録媒体は、2次元画素化検出器、例えば電荷結合素子(CCD)アレーのような電子的検出器であってよい。

放射手段は、好ましくは、直径20ミクロンまたはそれ以下のX線放射源を含む。ここで、直径とは、最大強度の半分のところでの放射源の強度分布の全幅を意味する。有利には、装置は、イメージされる内部境界を含む試料のための適当な支持台またはホルダーを更に含む。

透過性放射線、例えばX線は、多色性であってよく、好ましくは硬X線、すなわち1keV~1MeVの範囲にあるX線である。

境界の分離および検出手段は、イメージの解像度を高めるように選択するのが好ましい。例えば、より鮮明なイメージ、すなわちより高いコントラストを有するイメージは、解像度を増すことにより得られることが分かっている。例えば、コントラストは、0.4mの分離に対して少なくとも約1mの分離で改良される。これは、部分的には、分離を増すことによってバックグラウンドノイズは減少するが、伝搬の局所方向での変化から生じる強度変化効果は実質的に保存されるからである。

ここで用いる「横方向空間干渉性」という用語は、波の伝搬方向を横断する異

(10)

なる2点間での波の複素振幅の相関を意味する。横方向干渉性は、波面上の各点が時間の経過と共に変化しない伝搬の方向を有する場合に生じると言われている。実際には、高い横方向空間干渉性は、例えば、小さい有効寸法の放射源を用いることにより、または放射源から大きく離れた距離でビームを観察することにより達成し得る。例えば、20 keVのX線では、直径20 μm またはそれ以下の放射源寸法が、典型的には好ましい。放射源からの全光束が充分である限り、より小さい放射源寸法ほど、本発明の目的にとって好ましい。横方向空間干渉性は、放射源のX線窓を、例えばより均一な厚さおよび均質となるように注意深く選択することにより、維持する必要があるであろう。

添付図面を参照して、本発明の好ましい形態を例として以下に説明する。

図面中、図1は、円形断面对象物を平行ビームにより照射している状態を、説明のために3つの部分に分けて示している図であり、

図2は、多色性ビームにより照射されている円形断面对象物と、得られた位相差イメージを示す図であり、

図3は、本発明の1つの具体例に従ったX線光学系配置を示す図であり、

図4および図5は、以下に詳説する本発明に従って得られた種々の境界のX線イメージである。

まず、本発明の数学的基礎を概略説明する。

試料の厚さおよびX線屈折率の変化、 $n(\lambda) = 1 - \delta(\lambda) - i\beta(\lambda)$ は、常に、試料を通過する際のX線波面の形状の変化を招く。 n の実部 $1 - \delta(\lambda)$ は、屈折の程度に関係し、虚部 $-i\beta(\lambda)$ は、吸収の程度に関係する。より詳しく説明すると、単元素物質については、

$$\delta(\lambda) = \frac{\gamma_0 \lambda^2}{2\pi} N_0 f_R \quad (1)$$

$$\beta(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi} \mu(\lambda) \quad (2)$$

(式中、 $\mu(\lambda)$ は線形吸収係数、 γ_0 は古典電子半径、 N_0 は単位体積当たりの原子の数、および f_R は散乱角0（ゼロ）での原子散乱係数の実部である。)

(11)

係数 δ は、 λ_2 に比例し、 β は λ_4 に比例し、また λ は放射源から放射される X 線ホトンのエネルギーの逆数に比例する。

波面歪みの大きさは、波面の伝搬方向を横切る相変化の傾きに関連づけられる。幾何光学近似では、対象物を通過する光路についての位相差 ϕ は、光路にそつた屈折率 δ の実部の減少量の積分に比例する。図 1 に示す座標系では、これは次式で表される：

$$\phi(x, z) = k \int_0^z \{n(x, z') - 1\} dz' \quad (3)$$

(式中、 k は $2\pi/\lambda$ に等しい。)

局所入射波動ベクトルからの局所散乱波動ベクトルの角偏差 $\Delta\alpha$ は、局所入射波動ベクトルに垂直な方向での位相差の傾きに比例する。「局所」という語は、波面上の点 (x, y, z) を意味する。数学的には、局所散乱波動ベクトルは、図 1 の座標系では、次式で表される：

$$s(x, y, z) = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, k \right) \quad (4)$$

(式中、 $s(x, y, z)$ は点 (x, y, z) での波面に対する法線である。)

上記関係は、 $(\partial \phi / \partial x)^2 + (\partial \phi / \partial y)^2 \ll k^2$ である場合に近軸近似で有効である。角偏差 $\Delta\alpha$ は、次式で表される：

$$\Delta\alpha = \frac{1}{k} \frac{\partial \phi(x, z)}{\partial x} = \int_0^z \left\{ \frac{\partial n(x, z')}{\partial x} - 1 \right\} dz' \quad (5)$$

従つて、角偏差 $\Delta\alpha$ は、伝搬波動ベクトルに垂直な屈折率変化に依存し、偏差の量は、波動ベクトルの方向で変化が発生する長さ、例えば試料の厚さに依存する。

効果の本質を説明するために、図 1 および 2 に示すような、屈折率 $n_0 = 1$ の媒体中に埋設された屈折率 n_M の球形対象物 Ω を考える。

真空を通過する X 線と比べた試料を通過する X 線の光路長の差は、伝搬の局所方向を横切る方向 (図 1) で局所位相差 $\phi(x)$ を導き、従つて位相傾斜 $\partial \phi / \partial x$ を導く。z 軸から一定の距離で z 軸と平行に対象物 Ω を通過する ray 1 と参照 ray

(12)

0 との間の位相差は、次式で表される：

$$\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-z(x,y)}^0 \delta(\lambda) dz = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(\lambda) z(x,y) \quad (6)$$

[式中、 $z(x,y)$ は、対象物 Ω とray 1の交線の長さであり、

$$z(x,y) = 2\sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (7)$$

(ここで、 R は Ω の半径、 δ は屈折率係数の減少率である。)

で表される。]

数学的には、 $x-y$ 面での円形断面对象物については、与えられた x についての入射光と対応する屈折光との間の $\partial\phi/\partial x$ および角偏差 $\Delta\alpha$ の関係は、

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{1}{k} s(x,y,z) \\ &= \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial\phi}{\partial x} \\ &= -2\delta(\lambda) \left[\frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

で表される。式(8)中、 $\delta(\lambda)$ はゆっくり変化し、光線が光学軸から非常に大きい角度で逸脱できる $x = \pm R$ の点で、位相傾斜は発散することが容易に理解できる。これらの制限の中で、散乱された光線の角偏差は非常に大きく、対応する前進方向で強度 I の視認できる損失となる。その点は、多色光線Bについて図2に示しているように、波長に依存しない。屈折率係数 δ の減少率は、典型的には、軽い元素および硬X線については $10^{-5} \sim 10^{-6}$ のオーダーであるが、 x が $\pm R$ に近い場合、即ち試料の境界または内部境界部分では、角偏差 $\Delta\alpha$ は非常に大きいことがある。

放射源サイズ、対象物-放射源間距離および対象物-イメージ間距離の異なる条件下で得られるコントラストの特性、および放射源のスペクトル分布を考慮する必要がある。コントラストに影響する別の因子は、対象物により導入された波面の変化の程度である。

平面波については、イメージ形成におけるコントラストに対するこれら因子の

(13)

役割を理解するのを助けるために、位相対象物からのフレネル回折コントラストについて、第1近似として、Cowleyにより導き出された式を用いることができる (J. M. Cowley, "Diffraction Physics", 第2版、60頁。North Holland, 1981参照)。この式によれば、位相変化 $\phi(x)$ を生じる1次元位相対象物の場合、波長 λ の平面波照射下では、対象物からの距離 R_2 における強度分布は、

$$I(x) = 1 + \frac{R_2 \lambda}{2\pi} \phi''(x) \quad (9)$$

で与えられ、値 $(R_2 \lambda / 2\pi) \phi''(x)$ が小さいとした場合、1次まで妥当である。この一見簡単に見える式から、次の重要な結論が得られる。即ち、

i) コントラストは、 R_2 に対して直接的に変化する。

ii) イメージの形状は λ に依存しない。コントラストのみが影響される。多色放射源については、式中の λ をスペクトル的に加重した和により置き換えるだけでよい。

本発明のX線の場合について上記式が妥当する範囲についてのある程度の感触を得るために、対象物により伝送される位相が10ミクロンの横方向距離に対して1ラジアンだけ変化する対象物特性があると仮定しよう。そうすると、 $\phi'' = 10^{10} \text{m}^{-2}$ であり、 $\lambda = 1 \text{ \AA}$ 、 $R_2 = 1 \text{ m}$ の場合、 $(R_2 \lambda / 2\pi) \phi''(x) \leq 1$ となることが分かる。従って、この式は、小さい位相対象物についても、あるいは相の適当に早い変化についても、妥当である。しかしながら、例えば人工的な試験対象物 (例えば繊維) の計算によく用いられるような非常に急峻なエッジまたは傾斜の変化については、 ϕ'' は大きくなりすぎる (場合により無限になる) ことがあり、この式は、使えない。しかし、このような場合でも、イメージの一般的な形状 (急なステップ状対象物からの黒/白ライン) は再現できるが、不連続物からの回折に典型的な二次的な縞 (フリンジ) は再現できない。一方、恐らくより実際的には重要であるが、より小さい $\phi''(x)$ 、即ち横方向の変化がそれほど急速でないより大きい特性については、コントラストが小さく、実際の視認性が制限されることが分かる。

平面波によるこの種のイメージのより正確な数学的取り扱い、最近、フレネル回折を用いて行われた(P. Cloetens, R. Barrett, J. Baruchel, J. P. Guigay及びM. Schlenker、J. Phys. D.: Appld. Phys., 1996、29、133～46; J. P. Guigay, Optik, 1977、49、121～5)。彼らの取り扱いは、1次まで上記の式と同じである式を与える。しかしながら、より正確な取り扱いによれば、空間周波数 u についての最大コントラストは、少なくとも位相差放射線写真法において予想される条件の通常範囲について、 $2\lambda R_2 u^2 = 1$ の場合に生じる。空間周波数 u は、イメージされる対象物の形状に関係しており、 $u = 1/A$ であり、 A はイメージされた対象物のフーリエ成分の空間周期である。

このような取り扱いは全て、理想的な平面波による照射に関連している。ビームの発散は、 R_2 に比例する量でイメージをぼやけさせるであろう(これについては、常套の放射線写真と同様の挙動をする)。上記著者ら(Cloetensら)は、全体での最適 R_2 は、コントラストと解像度との両方を考慮して、次式で与えられることを示している：

$$R_2 \leq 2\lambda / \alpha^2 \quad (10)$$

(式中、 $\alpha = s/R_1$ は、対象物において放射源が臨む角度であり、(ほとんど)平面波に関連している。)

Cloetensらは、X線の高単色性放射源の必要性を特に強調し、本明細書に記載した好ましい実施態様とは対照的に平面波の場合のみを検討していることに注目しなければならない。

指摘したように、上記の取り扱いは、特に平面波の場合に関係し、一方、本発明は、従来の放射線写真法により密接に関連している球面波に関連している。空間波の場合を理解するのを助けるために、ここで、対象物から距離 R_1 の所にある点照射源により対象物をイメージする(球面波の場合)ためのフレネルーキルヒホッフ式の簡単な分析により有用に確立できる2つの場合の関係を検討する。この検討により、

$$(1/R') = (1/R_1) + (1/R_2) \quad (11)$$

のような距離 R' でイメージするための改変対象物および $(R_1 + R_2) / R_1$ により拡大される、平面波ケースを含む球面波について簡単な関係があることが示される。光線光学に基づいた簡単な幾何学的検討から、放射源サイズによるコントラストまたは解像度の減少は、イメージおよび放射源サイズの両方を拡大できるので、球面波の場合には問題ではないことが分かる。後者は、 R_2 / R_1 倍され、これは大きい R_2 については同じ倍率に漸近する。球形波についてのコントラストに影響する因子は、(放射線写真について当てはまるエネルギー範囲および解像度について) $2 \lambda R_2 (1 + R_2 / R_1) u^2$ が大きくなくてはならない (しかし、典型的には1未満である) ことである。この式は、 R_2 が大きい、または λ が大きい、または空間周波数 u が大きいので、大きくなり得る。説明すると、実際の放射線写真法のためには、以下の値が代表的である: $\lambda = 0.2 \text{ \AA}$; $u \leq 2 \times 10^5$ (空間周期 20 ミクロンまたはそれ以上に相当)。そして、 $R_2 = 2.5 \text{ m}$ (例えば、 $R_2 / R_1 = 3$ を仮定) で、最大空間周波数について最高のコントラストが得られる。より大きい R_2 の値が、より小さい空間周波数での最高コントラストにとって適切であろう。

関数 ϕ'' は、イメージ中の位相対象物のエッジまたは境界を増大する傾向があることに注意すべきである。対象物に吸収性成分があるなら、それは、少なくとも1次で、イメージのコントラストを直接増す (例えば、Guigay, 1997 の式7参照)。この技術は、補完的であり、有用な放射線イメージを向上し、かつ新しい情報を生み出す。また、位相差コントラスト (ϕ のラプラシアンを含む) を含むイメージ中のコントラストの適切な処理には、位相 $\phi(x)$ を取り出すために、例えば、強度方程式のトランスポートの解を介してイメージを数値的に処理する必要がある (T. E. Gureyev, A. Roberts および K. Nugent, Journal of Optical Society of America, A 12 巻、1932 頁および 1942 頁、1995 参照)。

次に、このような解法から生じる概念を適用するための具体的な配列について説明する。第1の具体例 (図3) では、高空間干渉性の放射源 S および X 線イメージング検出器 D (例えば、フィルム、光誘発リンプレート (Fuji Image Pl

(16)

atesなど)または2次元電子検出器)を用いる。伝搬方向を横切る方向でののはっきりした屈折率変化または伝搬方向での厚さ変化の領域は、このような領域を透過する波面の伝播の局所方向に顕著な変化を与える。従って、点放射源Sから放射された球面波面W1は、対象物Oを通過する際にW2に変形される。試料から相当離れた距離において波面の強度を記録することにより、試料中のはっきりした屈折率および厚さの変化に起因する強度変化を、検出でき、それらの位置をイメージ中に記録することができる。これは、差動位相差イメージの形状に対応する。イメージング検出器の配置は、検出器の空間解像度が、波面の著しい変形から生じる強度差を解像でき、かつ、上述のように実際の検討を条件にコントラストを最適化するように、設定される。

典型的には、屈折率または厚さの急峻な傾斜は、イメージ中の対応する点での強度の急峻な消失または急速な変化としてイメージされる。イメージ中の所定の点でのこの強度消失または急速な変化の特徴は、本質的に波長からは独立であり、従って、多色放射源を用いた場合でさえイメージ中に非常に鮮明な変化をもたらすことができる。

この構成は、円形照射源分布について、イメージの空間解像度が両方向で同じであり、本質的に照射源サイズにより決定されるという特徴を有している。また、この構成は、イメージの顕著な拡大が可能で、フジ・イメージ・プレート (Fuji Image Plates) のような記録媒体を使用できるという利点も有している。この記録媒体は、広いダイナミックレンジおよび高い感度のような多くの望ましい特性を有しているが、高い空間解像度は有していない。

この構成に含まれる照射源および検出器に加え、高解像度角分析器を、試料と検出器との間に挿入してもよい。高解像度角分析器は、例えば、照射源のある適切な特性波長に対して選択されたカーブを有するようにラウエ幾何学で適当にカーブをつけた石英ガラスであってよい。方法におけるこの変更は、最初に記載した構成により観察されよりも試料の屈折率および厚さの小さい変化を解像するためである。

非常に低い空間解像度検出器、例えばFuji Image Platesを用いてもイメージ

中の非常に高い空間解像度が得られるように、イメージの非常に実質的な増幅が可能であることは、注目されてよい。また、イメージ形成方法は本質的にX線エネルギーに依存しないので、放射源は高い管エネルギーで操作でき、従って試料が吸収する照射量を少なくできること（このことは、臨床用途では重要である）も注目されてよい。

上記方法を用いて記録した位相差イメージの例を、図4および図5に示す。図4は、 $10\mu\text{m}$ プラスチックフィルムのエッジのイメージを示す。このフィルムは、Davis, Gao, Gureyev, StevensonおよびWilkins (Phys. Rev. Letters, 1995, 74巻、3173頁)により使用されたのと同じであり、純粹相対象物に相当する。図5は、Davis, Gao, Gureyev, StevensonおよびWilkins (Nature, 373巻595～8頁1995)により報告されたのと類似の試料に基づくポリマーマトリックス中の気泡およびガラス繊維のイメージであり、ほとんど純粹な相対象物に相当する。いずれの場合にも、通常の吸収コントラストイメージについて予想される以上の、明瞭な付加的コントラストが見られる。特に、図4では、フィルムのエッジが、黒／白コントラスト特性として明瞭に見え、気泡および繊維のエッジでもそうである。使用した放射源は、40kVで作動されるCuアノードを備えた公称直径 $10\mu\text{m}$ のマイクロフォーカス放射源 (Kevex Model PXS) である。図4では、放射源と試料との距離および試料とフィルムとの距離は、共に700mmであり、一方、図5では、これらの距離はそれぞれ120mmおよび1000mmであった。これらの例でのコントラストは、放射源の高空間干渉性の故に、ほぼ全体に可視である。コントラストは、主として強度損失コントラストであり、その意味で、通常の吸収と似ているが、これは、式(8)で示されるように対象物境界での屈折散乱（またはフレネル回折）に起因する強度損失を表している点で異なる。直径0.1mmの基準微細焦点源は、写真に写っている長さ約0.1mmの投影寸法のスケールバーの投影寸法を有し、このコントラストではほとんど消えかかっている。

本明細書に記載した位相差イメージングと標準吸収イメージングとを比較するために、下記表に、65%吸収を達成するのに必要な炭素試料の吸収厚さ t_a 、

(18)

および 2π の ϕ で位相変化を生じさせるのに必要な試料の相厚さ t_p を、種々の放射源エネルギー E について示す。

表 1

$E(\text{keV})$	$\lambda(\text{\AA})$	$t_s(\mu\text{m})$	$t_p(\mu\text{m})$
50	0.25	435000	133
12	1	5000	30
1.2	10	4	3
0.25	50	1.3	1.2

表中の結果は、非常に小さい対象物を高いエネルギー源でイメージするのにどのように位相差イメージングを使用できるかを説明している。

有利なことに、試料と検出器との間のビーム光路は、空気散乱の効果を小さくして、光学特性がX線ビームの干渉性に有害な影響を与えないことを確実にするために、X線透過性窓または同様の手段を有する真空にされた管を含んでいてよい。

本発明の方法は、様々な種類の物質中のクラック、空洞および剥離のような特性をイメージするのに、特に適している。何故なら、これら特性は、X線屈折率での最大の差を含み、空間変化が非常に鮮明であるからである。観察できるコントラストを与えるために、照射源は、好ましくは、非常に小さい有効寸法、例えば $20\mu\text{m}$ のオーダー以下を有し、検出器は、好ましくは、高解像度検出器、例えばX線フィルムまたは2次元電子検出器（例えば、CCDアレー）である。本発明の方法は、臨床放射線写真法における重要な特性のコントラストを顕著に増大するのに有用であることが分かるであろう。

本発明は、透過性放射線、例えば硬X線を用いる差動位相差イメージングにおける簡素化された条件および構成を与え、これらは、特に臨床および産業用途を目指している。このような新しいアプローチは、特に大面積の照射の場合には、先に引用したWO95/05725およびPN5811/95に記載された方法よりも、吸収-コントラスト放射線写真法で用いられている従来の方法により密

(19)

接に関連している。本発明の方法では、先の単色法に比べて、所定の放射源出力について非常に短い露出時間でよい。これは、本発明が、放射源からの非常に広いスペクトルを使用できるからであろう。

(20)

【图 1】

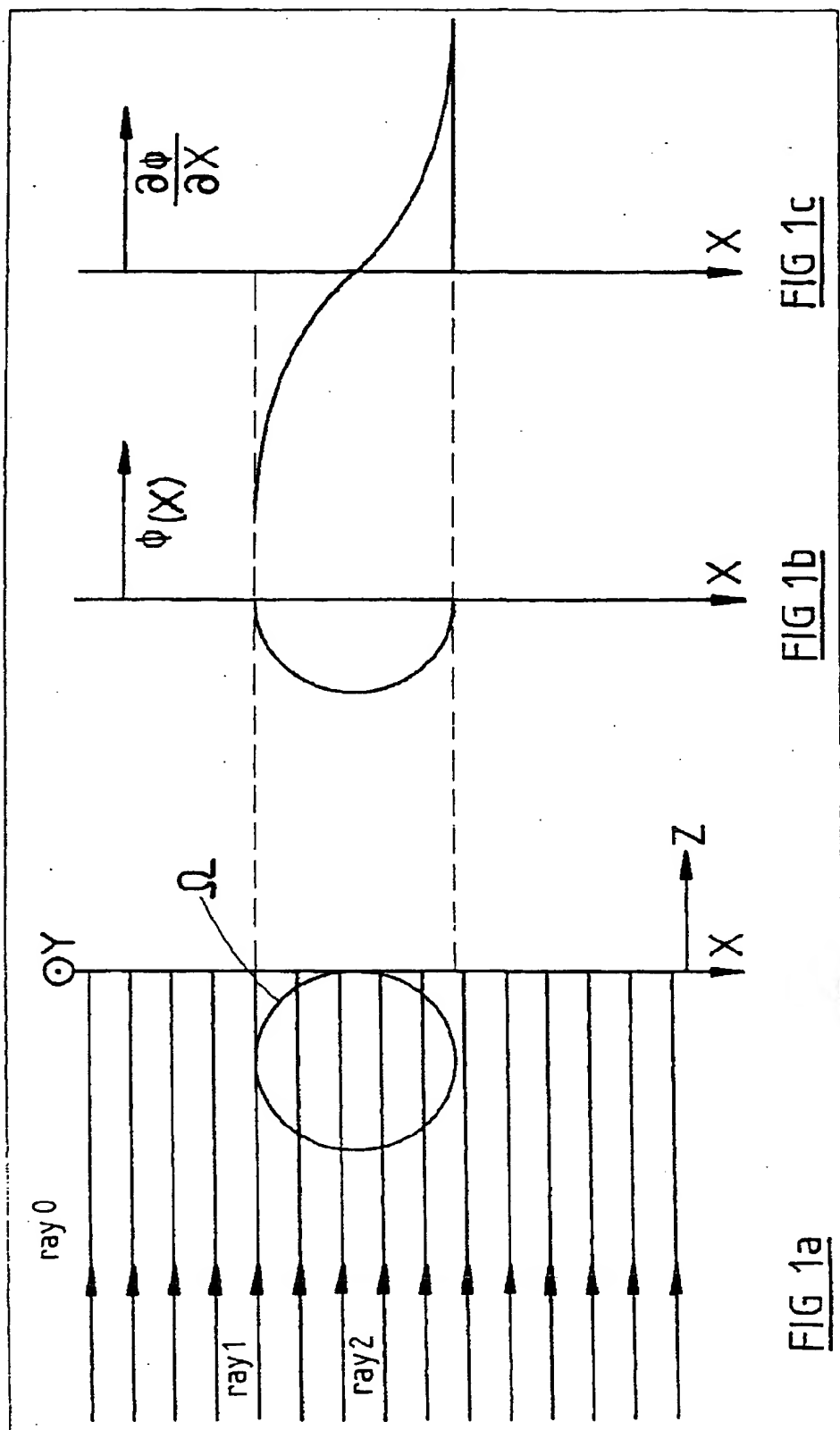


FIGURE 1

(21)

【図 2】

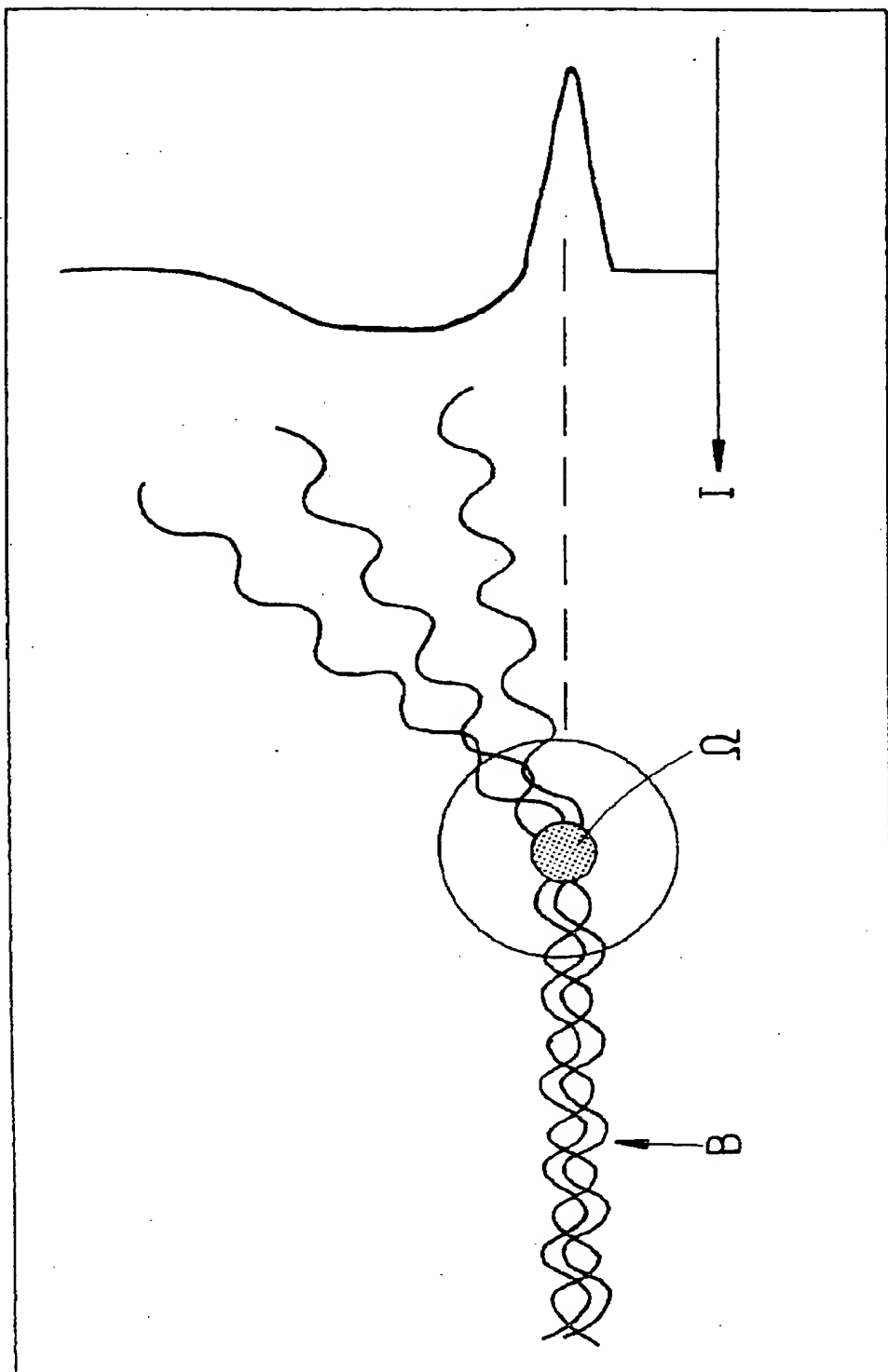


FIG 2

(22)

【図3】

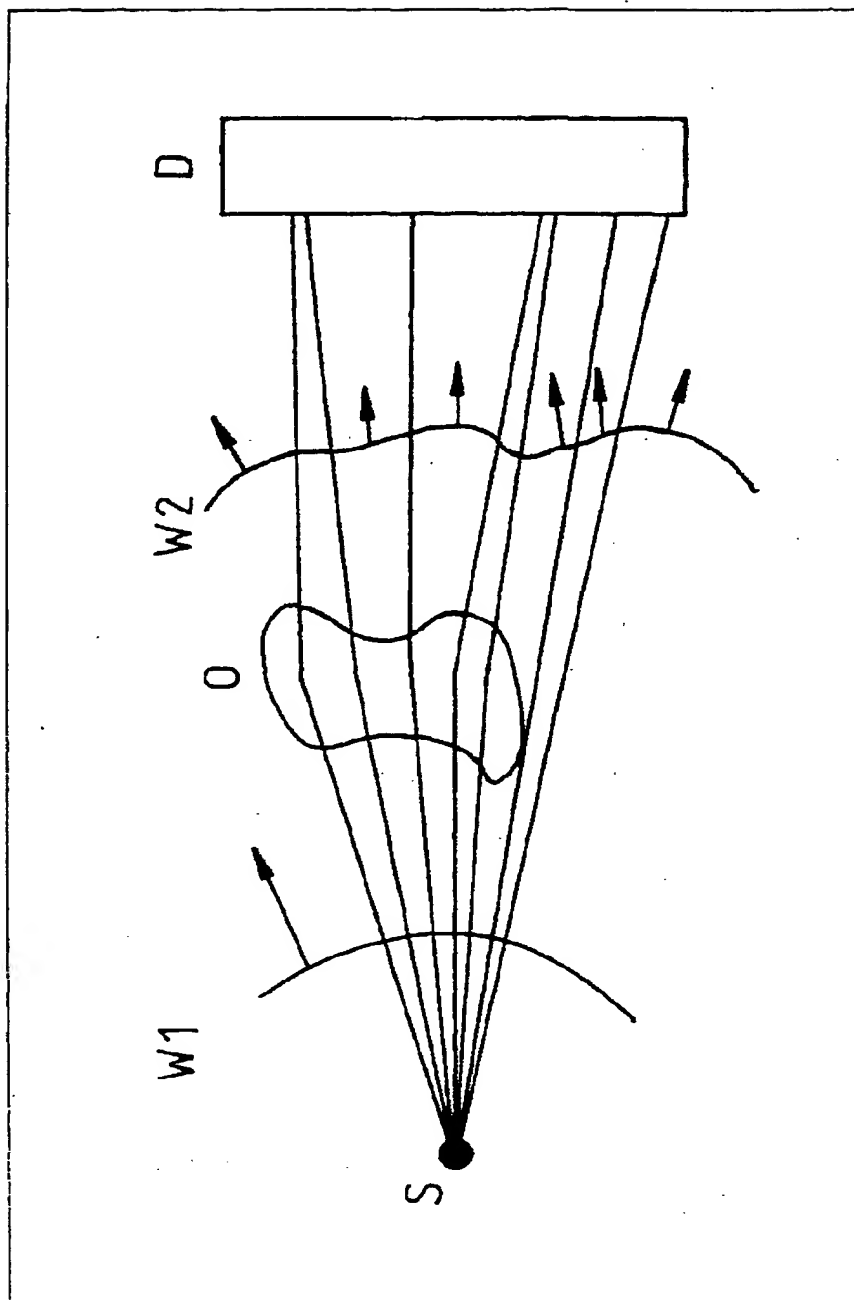


FIG 3

(23)

【図4】

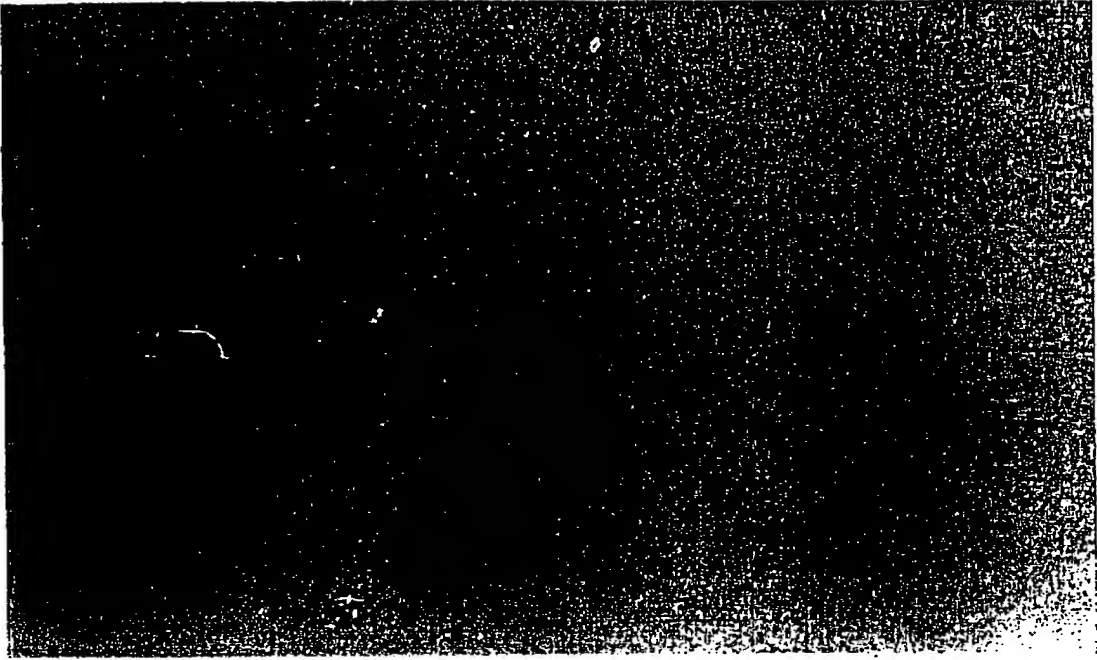
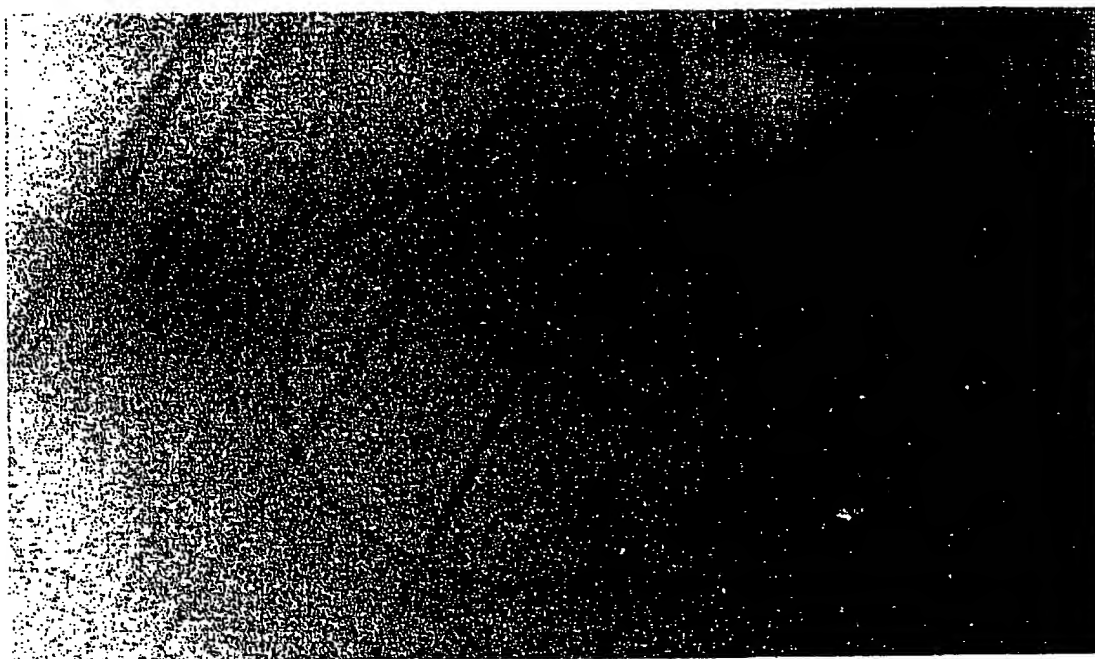


FIGURE 4

(24)

【图 5】



0.1 mm

FIGURE 5

(25)

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.
PCT/AU 96/00178

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
Int Cl ⁰ : H05G 1/02, G21K 1/02, G03B 42/02, A61B 6/00		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC : as above		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched AU : IPC as above		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) WPAT: JAPIO: INSPEC: MEDLINE (Phase() contrast, imag., X()RAY)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	WO 95/05725 A (CSIRO) 23 February 1995 whole document	35-40 6, 15, 21, 28
Y	US 5319694 A (INGAL et al) 7 June 1994 Abstract, Figures	1, 10, 19, 26
Y	US 4953188 A (SIEGAL et al) 28 August 1990 whole document	1, 10, 19, 26
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family	
Date of the actual completion of the international search 1 May 1996		Date of mailing of the international search report 9TH May 1996.
Name and mailing address of the ISA/AU AUSTRALIAN INDUSTRIAL PROPERTY ORGANISATION PO BOX 200 WODEN ACT 2606 AUSTRALIA Facsimile No.: (06) 283 3929		Authorized officer DALE SIVER Telephone No.: (06) 283 2196

(26)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

international Application No.

PCT/AU 96/00178

C (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	"Radiation damage in soft X-ray microscopy of live mammalian cells" (Shinohara et al) from Journal of Microscopy, Vol. 161, pt. 3, pp. 463-72, March 1991, Abstract, Table 1 References	6, 15, 21, 28, 33
Y	EP 274155 A (PHILIPS) 13 July 1988 Abstract, Figures, col. 4 lines 23-29	1, 10, 19, 26
Y	US 4200354 A (HOFFMAN) 29 April 1980 whole document	1, 10, 19, 26, 35-40
Y	OPTICS (Hecht/Zajac) 1973, pp. 449, 450 and pp. 474-479)	1, 10, 19, 33-40
A	EP 599361 A (IBM) 1 June 1994	
A	EP 466047 A (HITACHI) 15 January 1992	
A	US 5016267 A (CSIRO) 14 May 1991	

(27)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International Application No.

PCT/AU 96/00178

This Annex lists the known "A" publication level patent family members relating to the patent documents cited in the above-mentioned international search report. The Australian Patent Office is in no way liable for these particulars which are merely given for the purpose of information.

Patent Document Cited in Search Report				Patent Family Member			
WO	9505725	AU	74538/94				
US	5319694	EP WO	539608 9221016	JP	6507019	RU	2012872
US	4953188	CH	678663	DE	3819603	JP	2110400
EP	274155	DE US	3777594 4845352	JP	63155114	NL	8603108
US	4200354	CA GB	1031199 1502657	DE JP	2523464 51029149	FR	2284126
EP	599361	JP	6201602	US	5446540		
EP	466047	US	5173928	JP	4348262		
US	5016267	AT EP	89097 322408	AU JP	78077/87 2501338	DE WO	3785763 8801428
END OF ANNEX							

フロントページの続き

(81)指定国 EP(AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AP(KE, LS, MW, SD, SZ, UG), AL, AM, AT, AU, AZ, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, BE, HU, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, US, UZ, VN

【公報種別】特許法第17条第1項及び特許法第17条の2の規定による補正の掲載

【部門区分】第6部門第1区分

【発行日】平成15年9月9日(2003.9.9)

【公表番号】特表平11-502620

【公表日】平成11年3月2日(1999.3.2)

【年通号数】

【出願番号】特願平8-528711

【国際特許分類第7版】

G01N 23/04

G21K 1/02

【FI】

G01N 23/04

G21K 1/02 Z

手続補正書

平成15年 3月27日

特許庁長官様

1. 事件の表示

平成08年特許第528711号

2. 補正をする者

氏名(名称) エックスレイ・テクノロジー・
ユニブライエクサリ・リミテッド

3. 代理人

住所 〒540-0001
大東区大東市中央区城見1丁目3番7号 IMPビル
富山時勢事務所
電話 (06)6949-1251 FAX (06)6949-0561
氏名 弁護士(6214) 香山 満



4. 補正対象書類名 請求の範囲

5. 補正対象項目名 請求の範囲

6. 補正の内容 詳細のとおり。

請求の範囲

1. 屈折率変化を有する対象物の境界の画像を得る方法であって、
高い横方向の空間分辨率を有し、屈折率変化を横切る方向に伝播成分を有する透過性放射線を境界に照射するステップと、
放射線の少なくとも一部を画像面上に受光して、画像を形成するステップとを有し、
放射線は、境界が画像中の対応する強度変化によって画像上に表示されるように、境界により屈折されることを特徴とする方法。
2. 請求項1に記載の方法であって、
強度変化のコントラストを最大化するために、境界と画像面を所定の距離だけ隔てるステップを有することを特徴とする方法。
3. 請求項2に記載の方法であって、
所定の距離は、0.3m以上であることを特徴とする方法。
4. 請求項2に記載の方法であって、
所定の距離は、0.7m以上であることを特徴とする方法。
5. 請求項1に記載の方法であって、
放射線の屈折の程度は、長さに依存し、屈折率変化は、伝播成分の方向において境界で維持されることを特徴とする方法。
6. 請求項1に記載の方法であって、
放射線は、1keV～1MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線であることを特徴とする方法。
7. 請求項1に記載の方法であって、

(2)

3

放射線は、多色X線放射線であることを特徴とする方法。

8. 請求項1に記載の方法であって、

20 μm 以下の直径を有する線源を用いて、放射線が発生させるステップを有することを特徴とする方法。

9. 請求項1に記載の方法であって、

強度変化は、急峻で局在していることを特徴とする方法。

10. 屈折率変化を有する対象物の境界の画像を得る装置であって、

高い強度方向の空間干渉性を有し、屈折率変化を横切る方向に伝搬成分を有する透過性放射線を境界に照射する線源と、

放射線の少なくとも一部を画像面上に受光して、画像を形成する検出器とを有し、

放射線は、境界が画像中の対応する強度変化によって画像上に表示されるように、境界により屈折されることを特徴とする装置。

11. 請求項10に記載の装置であって、

強度変化のコントラストを際立たせるために、境界と画像表面を所定の距離だけ隔てることを特徴とする装置。

12. 請求項11に記載の装置であって、

所定の距離は、0.3m以上であることを特徴とする装置。

13. 請求項11に記載の装置であって、

所定の距離は、0.7m以上であることを特徴とする装置。

14. 請求項10に記載の装置であって、

放射線の屈折の程度は、長さに依存し、屈折率変化は、伝搬成分の方向におい

21. 請求項10に記載の方法であって、

放射線は、1keV～1MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線であることを特徴とする方法。

22. 請求項10に記載の方法であって、

20 μm 以下の直径を有する線源を用いて、放射線が発生させるステップを有することを特徴とする方法。

23. 請求項10に記載の方法であって、

境界と放射線の一部分を検出する位置との間を所定の距離だけ隔てるステップを有し、これにより、放射線強度の局所的減衰または急速な強度変化の記録を含む画像の一部のコントラストを際立たせ、そして/または解像度を改善することを特徴とする方法。

24. 請求項23に記載の方法であって、

所定の距離は、0.3m以上であることを特徴とする方法。

25. 請求項23に記載の方法であって、

所定の距離は、0.7m以上であることを特徴とする方法。

26. 鮮明な屈折率変化を有する内部境界の位相差記録を得る装置であって、

伝搬方向を有するX線放射線を境界に照射する手段を有し、

X線放射線は、屈折率変化の方向を横切る方向において、実質的な伝搬ベクトル成分を有し、さらに境界における放射線波面の局所的伝搬方向の変化を検出できる程度に十分大きい屈折率変化が得られる横方向の空間干渉性を有し、

この装置は、放射線が境界を横切った後に、放射線の少なくとも一部分を検出し、記録する手段をさらに有し、

局所的伝搬方向の変化を、放射線強度の局所的減衰または急速な強度変化として検出し、記録することにより、境界の画像を形成および検出する装置。

4

て境界で維持されることを特徴とする装置。

15. 請求項10に記載の装置であって、

放射線は、1keV～1MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線であることを特徴とする装置。

16. 請求項10に記載の装置であって、

放射線は、多色X線放射線であることを特徴とする装置。

17. 請求項10に記載の装置であって、

20 μm 以下の直径を有する線源を用いて、放射線が発生させるステップを有することを特徴とする装置。

18. 請求項1に記載の装置であって、

強度変化は、急峻で局在していることを特徴とする装置。

19. 鮮明な屈折率変化を有する内部境界の位相差記録を得る方法であって、

伝搬方向を有する透過性放射線を境界に照射するステップを有し、

透過性放射線は、屈折率変化の方向を横切る方向において、実質的な伝搬ベクトル成分を有し、さらに境界における放射線波面の局所的伝搬方向の変化を検出できる程度に十分大きい屈折率変化が得られる横方向の空間干渉性を有し、

この方法は、放射線が境界を横切った後に、放射線の少なくとも一部分を検出し、記録するステップをさらに有し、

局所的伝搬方向の変化を、放射線強度の局所的減衰または急速な強度変化として検出し、記録することにより、境界の画像を形成および検出する方法。

20. 請求項19に記載の方法であって、

放射線は、多色X線放射線であることを特徴とする方法。

27. 請求項26に記載の装置であって、

放射線は、多色X線放射線であることを特徴とする装置。

28. 請求項26に記載の装置であって、

放射線は、1keV～1MeVの範囲のエネルギーを有するX線放射線であることを特徴とする装置。

29. 請求項26に記載の装置であって、

20 μm 以下の直径を有する線源を用いて、放射線が発生させるステップを有することを特徴とする装置。

30. 請求項26に記載の装置であって、

境界と放射線の一部分を検出する位置との間を所定の距離だけ隔てることにより、放射線強度の局所的減衰または急速な強度変化の記録を含む画像の一部のコントラストを際立たせ、そして/または解像度を改善することを特徴とする装置。

31. 請求項30に記載の装置であって、

所定の距離は、0.3m以上であることを特徴とする装置。

32. 請求項30に記載の装置であって、

所定の距離は、0.7m以上であることを特徴とする装置。

33. 屈折率変化を有する対象物の境界の画像を得る方法であって、

高い横方向の空間干渉性を有し、屈折率変化を横切る方向に伝搬成分を有する透過性放射線を境界に照射するステップと、

放射線の少なくとも一部を画像面上に受光して、画像を形成するステップとを有し、

放射線は、境界が画像中の対応する強度変化によって画像上に表示されるよう

(3)

5

に、境界によりフレネル回折されることを特徴とする方法。

3.4. 屈折率変化を有する対象物の境界の画像を得る装置であって、
高い横方向の空間周波数性を有し、屈折率変化を横切る方向に伝播成分を有する透過性放射線を境界に照射する線源と、
放射線の少なくとも一部を画像面上に受光して、画像を形成する検出器とを有し、
放射線は、境界が画像中の対応する強度変化によって画像上に表示されるように、境界によりフレネル回折されることを特徴とする方法。

3.5. 請求項1ないし9または19ないし23のいずれか1に記載の方法を用いて得たイメージを処理するステップを有する、画像の位相を決定する方法。

3.6. 請求項35に記載の方法であって、
処理は、電磁放射についてのマクスウェル方程式に基づくことを特徴とする方法。

3.7. 請求項36に記載の方法であって、
方程式は、強度方程式のトランスポートであることを特徴とする方法。

3.8. 請求項1に記載の方法であって、
放射線は、線源から発生し、ブラッグ回折することなく境界へ供給されることを特徴とする方法。

3.9. 請求項10に記載の方法であって、
放射線は、線源から発生し、ブラッグ回折することなく境界へ供給されることを特徴とする方法。

6

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.